

罗非鱼体内土腥味物质的分布特征研究

邹剑敏^{1,2,3}, 卢奇⁴, 桂源⁴, 钟立强⁵, 宋超^{1,2,3,4*}, 陈家长^{1,2,3,4*}

[1. 中国水产科学研究院淡水渔业研究中心, 无锡 214081; 2. 农业农村部水产品质量安全环境因子风险评估实验室(无锡), 无锡 214081; 3. 农业农村部水产品质量安全控制重点实验室, 北京 100141; 4. 南京农业大学无锡渔业学院, 无锡 214081; 5. 江苏省淡水水产研究所, 南京 210017]

摘要: **目的** 探究罗非鱼体内土腥味物质在不同组织间的分布特征, 为罗非鱼土腥味问题提供膳食建议。**方法** 采用微波辅助蒸馏-固相微萃取-气相色谱分析法对养殖水体和罗非鱼体内各部位(罗非鱼肠道内容物、血液、肝脏和肌肉组织)的土臭素(geosmin, GSM)和二甲基异茨醇(2-methylisoborneol, 2-MIB)进行检测和比较。**结果** 检出的土腥味物质为 GSM, 2-MIB 未检出。鱼肉中 GSM 浓度均值范围分别为血液 0.59~0.80 $\mu\text{g/L}$ 、肠道内容物 2.27~5.00 $\mu\text{g/kg}$ 、肝脏 0.97~2.58 $\mu\text{g/kg}$ 、肌肉 0.64~0.97 $\mu\text{g/kg}$, 肠道内容物中 GSM 含量显著高于肝脏、血液和肌肉($P<0.05$), 肝脏则显著高于血液和肌肉($P<0.05$)。鱼体土腥味贡献率依次为肌肉组织>肠道内容物>肝脏>血液。**结论** 水体和鱼体中的 GSM 含量具有明显的相关性($r^2=-0.293$ 、 $r^2=0.238$ 、 $r^2=0.488$ 、 $r^2=0.524$), 罗非鱼中的土腥味物质在肠道中含量最高, 但是根据贡献率, 罗非鱼的土腥味物质主要集中在肌肉中, 肌肉是罗非鱼土腥味的主要贡献者。

关键词: 罗非鱼; 土腥素; 二甲基异茨醇; 固相微萃取; 膳食评估

Study on distribution characteristics of earthy odor in tilapia

ZOU Jian-Min^{1,2,3}, LU Qi⁴, GUI Yuan⁴, ZONG Li-Qiang⁵,
SONG Chao^{1,2,3,4*}, CHEN Jia-Zhang^{1,2,3,4*}

[1. Freshwater Fisheries Research Center, Chinese Academy of Fishery Sciences, Wuxi 214081, China; 2. Laboratory of Quality & Safety Risk Assessment for Aquatic Products on Environmental Factors (Wuxi), Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Wuxi 214081, China; 3. Key Laboratory of Control of Quality and Safety for Aquatic Products, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100141, China; 4. Wuxi Fishery College of Nanjing Agricultural University, Wuxi 214081, China; 5. Jiangsu Province Freshwater Fisheries Research Institute, Nanjing 210017, China]

ABSTRACT: Objective To explore the distribution characteristics of earthy odor in different tissues of tilapia, and provide dietary suggestions for earthy odor problems of earthy odor in tilapia. **Methods** Geosmin (GSM) and 2-methylisobornenol (2-MIB) in various parts (intestinal content, blood, liver and muscle tissues of tilapia) of

基金项目: 中国水产科学研究院淡水渔业研究中心基本科研业务费(2021JBFM18)、国家自然科学基金项目(32002378)、国家现代农业产业技术体系(CARS-46)

Fund: Supported by the Basic Research Funds of Freshwater Fisheries Research Center, Chinese Academy of Fishery Sciences (2021JBFM18), the National Natural Science Foundation of China (32002378), and the National Modern Agricultural Industrial Technology System (CARS-46)

***通信作者:** 宋超, 副研究员, 主要研究方向为渔业生态环境和水产品质量安全和风险评估方面的研究。E-mail: songchao@ffrc.cn

陈家长, 研究员, 主要研究方向为渔业生态环境修复。E-mail: chenjz@ffrc.cn

***Corresponding author:** SONG Chao, Associate Professor, Freshwater Fisheries Research Center, Chinese Academy of Fishery Sciences, No.9, Shanshui East Road, Binhu District, Wuxi 214081, China. E-mail: songchao@ffrc.cn

CHEN Jia-Zhang, Professor, Freshwater Fisheries Research Center, Chinese Academy of Fishery Sciences, No.9, Shanshui East Road, Binhu District, Wuxi 214081, China. E-mail: chenjz@ffrc.cn

aquaculture water and tilapia were detected and compared by microwave-assisted distillation-solid phase microextraction-gas mass spectrometry. **Results** The detected earthy odor substance was GSM, and 2-MIB was not detected. The mean concentrations of GSM in fish ranged from 0.59-0.80 $\mu\text{g/L}$ in blood, 2.27-5.00 $\mu\text{g/kg}$ in intestinal content, 0.97-2.58 $\mu\text{g/kg}$ in liver, and 0.64-0.97 $\mu\text{g/kg}$ in muscle. The content of GSM in intestinal contents was significantly higher than that in liver, blood and muscle ($P<0.05$), and that in liver was significantly higher than that in blood and muscle ($P<0.05$). The contribution rate of earthy odor in fish was in the order of muscle tissue>intestinal content>liver>blood. **Conclusion** There is a significant correlation between fish and GSM content in water ($r^2=-0.293$, $r^2=0.238$, $r^2=0.488$, $r^2=0.524$), and the earthy smell of tilapia is the highest in intestinal tract, but according to the contribution rate, the earthy smell of tilapia is mainly concentrated in muscle, and muscle is the main contributor to the earthy smell of tilapia.

KEY WORDS: tilapia; geosmin; 2-methylisoborneol; solid phase microextraction; dietary evaluation

0 引言

罗非鱼(*Oreochromis mossambicus*)也叫非洲鲫鱼,属于鲈形目(Perciformes)、慈鲷科(Cichlidae),广泛分布于非洲淡水水域,是一种以植物性食物为主的杂食性鱼类。由于其营养价值高、食性杂、对高密度养殖的耐受性强及抗病性较高,罗非鱼养殖产业在我国飞速发展,2019年,罗非鱼养殖产量已达164.17万t^[1],成为我国重要的出口导向性水产品之一。罗非鱼有很高营养价值,蛋白质含量和质量都很高,不仅富含人体所需的8种必需氨基酸,而且蛋白质和氨基酸的组成也非常均衡^[2-3]。罗非鱼还含有丰富的脂肪酸,尤其是营养价值较高的多不饱和脂肪酸,其多不饱和脂肪酸含量可达脂肪酸总含量的20%以上^[4]。罗非鱼拥有巨大的开发潜力。

罗非鱼具有肉质厚嫩、刺少、营养价值高等特点,是非常优质的淡水水产品。但是,罗非鱼自身的土腥味使其难以被广大消费者普遍接受,因此,如何解决土腥味成为罗非鱼产业面临的重大难题。罗非鱼体内含有大量的土腥味物质是造成其土腥味的主要原因,目前在水体中的土腥味物质主要有5种,分别为土腥素(geosmin, GSM)、2-甲基异莰醇(2-methylisoborneol, 2-MIB)、2-异丁基-3-甲氧基吡嗪(2-isobutyl-3-methoxy-pyrazine, IBMP)、2,3,6-三氯苯甲醚(2,3,6-trichloroanisole, TCA)、2-异丙基-3-甲氧基吡嗪(2-isopropyl-3-methoxy-pyrazine, IPMP),主要以GSM和2-MIB为主^[5-6]。在鱼体中,当GSM含量超过0.9 $\mu\text{g/kg}$ 、2-MIB含量超过0.6 $\mu\text{g/kg}$ 时,就会产生明显的土腥味^[7]。水产品土腥异味是因为富集了水体中的土腥味物质导致,以蓝藻为主的浮游植物^[8-10]和某些放线菌^[11]是养殖水体中土腥味物质(主要指GSM和2-MIB)的主要来源。水体中的GSM和2-MIB进入鱼体中的途径属于被动吸收,往往是通过鱼鳃、皮肤接触和直接摄食藻类进入鱼体,从而完成积累^[12]。有研究表明,在水体中GSM和2-MIB含量处于9和4 ng/L 时,养殖水产品就会带上土腥味^[13]。因此,水体中GSM和2-MIB的含量将直接影响水产品土腥程度

的高低。在池塘养殖水体中,由于养殖密度较大,饲料投喂量较高,导致饵料残余过多,水体往往处于富营养化状态。在这种情况下,水体中蓝藻等浮游植物和放线菌往往生长过剩,会导致水体GSM、2-MIB含量处于较高浓度水平。在鱼体中,GSM和2-MIB的含量在不同组织中可能存在差异^[14-15],在鱼体脂肪含量较高的组织中,往往更容易产生土腥味物质的积累。目前关于鱼体不同组织中土腥味物质的分布研究较少。本研究通过比较罗非鱼不同组织间GSM和2-MIB的含量差异,探究其在罗非鱼体内的分布规律,评估罗非鱼不同组织间的土腥味物质含量,提出有利于罗非鱼去腥的膳食加工方式。本研究将为优化罗非鱼的食用方式提供一定的科学依据,为罗非鱼产业发展提供一定帮助。

1 材料与方法

1.1 试剂与仪器

氯化钠(分析纯,国药集团化学试剂有限公司); EDTA2钾抗凝剂(ethylene diamine tetraacetic acid dipotassium blood anticoagulant,分析纯,上海阿拉丁生化科技股份有限公司)。

Agilent7890B气相色谱-质谱联用仪(美国Agilent公司); SAAA-SPME-ST固相微萃取手动套装、50/30 μm DVB/CAR/PDMS的固相微萃取纤维(上海安谱实验科技股份有限公司); MCR-3E微波萃取仪(上海冉富仪器有限公司); AL-104电子分析天平[梅特勒-托利多国际贸易(上海)有限公司]; Master-QUT水纯化系统(上海合泰仪器有限公司)。

1.2 样品采集

本研究样品来自无锡宜兴市的淡水渔业研究中心罗非鱼养殖基地。于该基地选择7个罗非鱼养殖池塘,每个池塘随机采集3条达上市规格的罗非鱼。采集的鱼类样本麻醉后分别采取血液、肝脏、肠道内容物和肌肉组织。使用10 mL注射器通过尾静脉采血法采集血液样本,血液采集后,立即

加入 EDTA2 钾抗凝剂防止血液凝固, 样本于 4 °C 冷藏保存。肝脏和肠道内容物装入 15 mL 康宁管, 肌肉组织使用锡箔纸包裹后装入自封袋后一同冷冻保存于 -18 °C 冰箱。测定前需对肝脏和肌肉样本进行解冻和匀浆处理。

1.3 土腥味物质测定

1.3.1 GSM 和 2-MIB 的提取

本研究通过微波蒸馏的方式提取样品中的 GSM 和 2-MIB: 设置参数为载气流速 60 mL/min, 微波功率 400 W, 冷凝循环水温度控制在 5 °C, 蒸馏时间 6 min, 用纯水定容收集包含馏分的水溶液至 250 mL。蒸馏装置如图 1 所示。

顶空固相微萃取收集所得溶液中的 GSM 和 2-MIB: 按照水盐质量比 5:1 的比例加入 2 g 氯化钠和 10 mL 馏分溶液, 后移入 15 mL 顶空固相微萃取小瓶中。加入磁力搅拌子, 将型号为 50/30 μm DVB/CAR/PDMS 的固相微萃取纤维插入带 PTFE 涂层硅橡胶垫的瓶盖进行顶空吸附, 设置搅拌速度 1200 r/min, 温度控制在 60 °C, 萃取时间 30 min, 结束后立即将萃取纤维插进气相色谱-质谱进样口, 使用气相色谱-质谱联用仪 (gas chromatography-mass spectrometer, GC-MS) 进行分析。

1.3.2 GSM 和 2-MIB 测定

色谱条件: 使用规格为 (30 m×0.25 mm, 0.25 μm) 的 DB-5MS 色谱柱; 升温程序按照起始温度 50 °C, 保持

1 min, 以 10 °C/min 的速率升温至 200 °C, 保持 1 min, 以 20 °C/min 的速率保持 1 min, 升温至 220 °C, 保持 1 min; 不分流进样; 进样口温度 250 °C; 进样口压力: 7.66 psi; 总流量: 44 mL/min; 载气氦气 (He)。

质谱条件: 电子电离源 (electron ionization, EI); 离子化能量 70 eV; 离子源温度 230 °C; MS 四极杆温度 150 °C; 传输线温度 250 °C; 溶剂延迟 5 min; GSM 和 2-MIB 定量离子质荷比 (m/z) 分别为 112、95。

1.4 数据分析

通过计算单个组织和鱼体重量的比值与该组织中 GSM 含量的乘积得到该组织中 GSM 负担 (式 1), 所有组织 GSM 负担通过求和得到整个鱼体的全身 GSM 负担 (式 2)。最后通过计算各部分组织与整个鱼体的比值即可得到对应组织中 GSM 占整体的比例 (式 3), 以此表示该组织对整个鱼体的土腥味贡献程度。

$$\text{GSM 负担}_{(\text{组织})} = \text{重量}_{(\text{组织})} / \text{重量}_{(\text{鱼体})} \times \text{GSM}_{(\text{组织含量})} \dots \dots (1)$$

$$\text{GSM 负担}_{(\text{鱼体})} = \sum \text{GSM 负担}_{(\text{组织})} \dots \dots \dots (2)$$

$$\text{GSM 贡献} = \text{GSM 负担}_{(\text{组织})} / \text{GSM 负担}_{(\text{鱼体})} \times 100 \quad (3)$$

所得数据均用平均值±标准差 ($\bar{X} \pm \text{SD}$) 表示, 差异性通过 SPSS 25.0 软件进行单因素 ANOVA 检验, 显著性水平为 $P < 0.05$ 。图表以 Excel 工具制作。

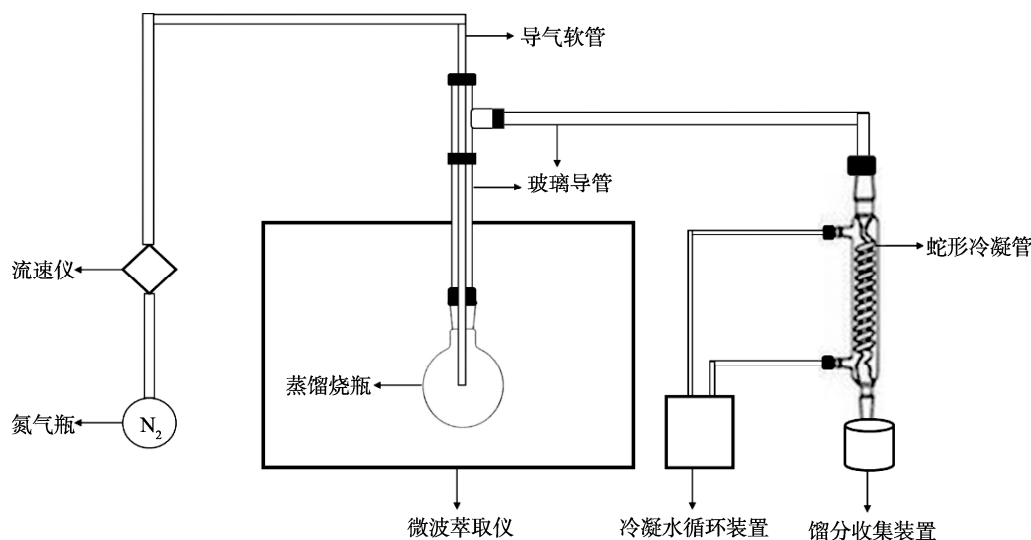


图 1 微波蒸馏装置

Fig.1 Microwave distillation unit

2 结果与分析

2.1 罗非鱼不同组织中的 GSM 和 2-MIB 含量

对 7 组罗非鱼样品的池塘水体和 4 个鱼体组织 (血液、肠道内容物、肝脏及肌肉) 进行 GSM 和 2-MIB 含量检测。

水体中土腥味物质主要以 GSM 为主, 7 个池塘中均有检出, 含量均值在 14.76~63.95 ng/L 之间, F 组的 GSM 含量最高, A 组含量最低; 2-MIB 仅在 E、F、G 组 3 个池塘中检出, 含量差异较大, 平均含量分别为 4.85、114.34、1.11 ng/L。而在罗非鱼组织中, 各组织 GSM 含量不同, 其浓度均值范围分别为血液 0.59~0.80 μg/L、肠道内容物 2.27~5.00 μg/kg、

肝脏 0.97~2.58 $\mu\text{g/kg}$ 、肌肉 0.64~0.97 $\mu\text{g/kg}$, 除血液外, 其他组织 GSM 含量均不同程度地超出了人体对于 GSM 的嗅闻阈值; 2-MIB 均未检出(表 1)。对 7 组罗非鱼样品的 4 个组织(血液、肠道内容物、肝脏及肌肉)和池塘水体进行 GSM 含量的相关性分析, 相关系数分别为 $r^2=-0.293$ 、 $r^2=0.238$ 、 $r^2=0.488$ 、 $r^2=0.524$ 。

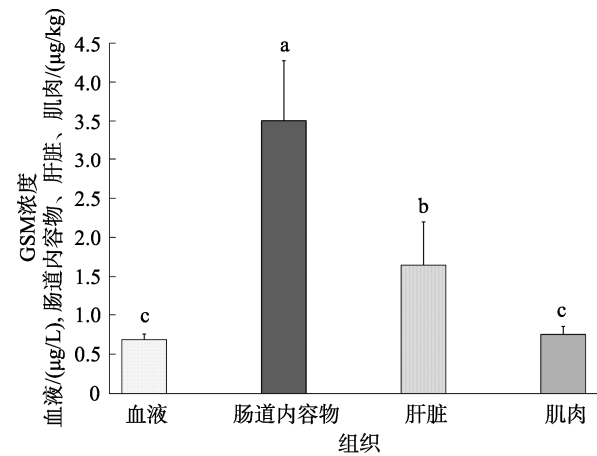
表 1 罗非鱼各组织间 GSM 和 2-MIB 含量情况
Table 1 GSM and 2-MIB content in different tissues of tilapia

组织	血液/($\mu\text{g/L}$)		肠道内容物/($\mu\text{g/kg}$)		肝脏/($\mu\text{g/kg}$)		肌肉/($\mu\text{g/kg}$)	
样品组	GSM	2-MIB	GSM	2-MIB	GSM	2-MIB	GSM	2-MIB
A	0.62±0.22	ND	3.71±0.54	ND	1.17±0.15	ND	0.64±0.15	ND
B	0.80±0.15	ND	2.27±0.62	ND	0.97±0.15	ND	0.71±0.13	ND
C	0.74±0.14	ND	3.40±0.14	ND	2.06±0.82	ND	0.73±0.20	ND
D	0.75±0.24	ND	3.08±0.38	ND	1.50±0.33	ND	0.66±0.12	ND
E	0.59±0.15	ND	3.25±0.44	ND	1.18±0.25	ND	0.78±0.26	ND
F	0.65±0.06	ND	3.81±0.29	ND	2.58±0.11	ND	0.77±0.16	ND
G	0.65±0.02	ND	5.00±0.34	ND	2.06±0.65	ND	0.97±0.16	ND

注: ND 代表未检出。

2.2 罗非鱼不同组织间 GSM 和 2-MIB 含量比较

由于样品中均未检出 2-MIB, 因此本研究只对 GSM 进行各组织含量比较。如图 2 所示, GSM 在肠道内容物中含量最高, 浓度均值达到了 3.50 $\mu\text{g/kg}$, 而在血液和肌肉中相对较低, 分别为 0.67 $\mu\text{g/L}$ 和 0.75 $\mu\text{g/kg}$ 。经差异性分析后发现, 肠道内容物中 GSM 含量均显著高于肝脏、血液和肌肉($P<0.05$), 肝脏则显著高于血液和肌肉($P<0.05$), 而在血液和肌肉中, GSM 含量不存在显著性差异($P>0.05$)。



注: 不同小写字母代表差异显著($P<0.05$)。

图 2 不同组织的 GSM 浓度($n=3$)

Fig.2 GSM concentration in different tissues ($n=3$)

2.3 GSM 在不同组织对整个罗非鱼体土腥味的相对贡献

根据公式(1)、(2)、(3)和各组织在鱼体中的质量, 计算结果如表 2 所示。可见对鱼体土腥味贡献最大的组织是肌肉

组织, 尽管在肌肉组织中 GSM 的含量显著低于肠道内容物和肝脏组织($P<0.05$), 但其 GSM 贡献率却远高于肠道内容物和肝脏, 达到了 77.90%。血液对罗非鱼体土腥味的贡献最低, 仅占 1.89%。

表 2 各组织 GSM 贡献率
Table 2 GSM contribution rate of different tissues

	血液 /($\mu\text{g/L}$)	肠道内容物 /($\mu\text{g/kg}$)	肝脏 /($\mu\text{g/kg}$)	肌肉 /($\mu\text{g/kg}$)
GSM 负担(组织)	0.01±0	0.06±0.01	0.02±0.01	0.29±0.04
GSM 贡献率/%	1.89	14.83	5.38	77.90

3 讨 论

近年来, 罗非鱼土腥味问题越来越受到关注, 许多学者对罗非鱼土腥味问题进行了研究, 张凯^[16]在探究养殖模式和罗非鱼土腥味的关系时, 测得罗非鱼肌肉中 GSM 为 0.53±0.04 $\mu\text{g/kg}$; 王国超等^[17]测得罗非鱼肉中 GSM 含量为 1.21 $\mu\text{g/kg}$, 这与本研究测得的 GSM 含量没有明显差距。此外, 根据本研究测得的结果, 除血液外, 罗非鱼鱼体肝脏、肠道内容物、肌肉中 GSM 含量均超出人类感官阈值。罗非鱼土腥味问题在罗非鱼养殖业中普遍存在, 研究分析土腥味物质的来源、在水体中的分布和对鱼体的作用途径对控制罗非鱼土腥味有着实际参考价值。

3.1 罗非鱼各组织土腥味物质含量与水体的关系

水体是鱼体中的 2-MIB 和 GSM 主要来源^[18], 在水体中, 以蓝藻为主的浮游藻类和放线菌产生的 GSM 和 2-MIB^[19]被鱼体吸收后积累在脂肪组织中。所以, 水体和鱼

体中的 GSM 和 2-MIB 具有相关性。本研究的实验结果验证了这一结论。本研究测得罗非鱼养殖水体中主要土腥味物质是 GSM, 2-MIB 的含量则相对较低, 同样的在罗非鱼体中 GSM 是检出的主要土腥味物质, 2-MIB 未检出。许多学者也得出了类似的结论, LINDHOLM-LEHTO 等^[18]通过研究 GSM 和 2-MIB 在水体与虹鳟体内的关系, 指出 GSM 含量超过 20 ng/L 时, 水体中 96% 的鱼都会产生强烈的土腥味; 王赛^[20]认为池塘的底质决定了水质和藻类的变化, 进而影响水体中异味物质的分布, 最终影响了养殖产品体内的异味物质含量^[21]。水体中土腥味含量能够影响鱼体中土腥味物质的含量, 二者呈正相关关系, 而水体中的土腥味物质主要来自以蓝藻为主的浮游藻类和放线菌, 所以控制水体中藻类的含量, 有利于降低罗非鱼的土腥味。

3.2 GSM 在罗非鱼体内的分布规律

本研究测定了罗非鱼肠道内容物、肝脏、血液及肌肉组织中 GSM 和 2-MIB 的含量, 通过比较, 发现在罗非鱼肠道中 GSM 浓度最高, 但在肌肉中积累最多, 贡献率远高于其他组织。GSM 和 2-MIB 在罗非鱼体内的分布和组织有关, 相比较于肠道内容物、肝脏和血液, 肌肉积累最多的 GSM 和 2-MIB。GSM 和 2-MIB 均为亲脂类化合物, 能积累于脂肪中^[21], 所以鱼体脂肪含量将直接影响其对于土腥味物质的积累。韩萃等^[22]在研究虹鳟体内土腥味物质分布的实验中发现, 虹鳟背肌脂含量与 2-MIB 和 GSM 含量显著相关, 这与 YARNPAKDEE 等^[15]的发现相似, YARNPAKDEE 等也在研究中也发现尼罗罗非鱼和斑点胡子鲶腹部肌肉中 GSM 和 2-MIB 含量高于其背部肌肉, 其原因也是鱼体腹部肌肉脂肪含量高于背部肌肉脂肪含量。鱼体中的脂肪含量与 2-MIB 和 GSM 含量具有相关性, 鱼体脂肪越高, 对于 GSM 和 2-MIB 的富集就越强。结合本研究结果, 罗非鱼肌肉组织中 GSM 含量均高于肠道、血液和肝脏组织的原因可能就在于各组织脂肪含量的不同, 肌肉中脂肪含量均高于其他组织。

GSM 和 2-MIB 通过摄食进入鱼体后, 首先存在于肠道内容物中, 于是导致肠道中含有较高 GSM 水平。无论是通过鱼鳃、体表或是肠道途径被鱼体吸收的腥味物质, 都会经过血液循环这一过程, 通过血液循环 GSM 进一步传递到鱼体各个组织中, 最后通过毛细血管末端被肌肉所富集。因此, 肌肉组织作为土腥味物质在鱼体中传递的终端, 其 GSM 含量必然最高, 对鱼体土腥味的贡献也必然最高。目前关于土腥味物质在鱼体中的具体富集途径的相关研究不多, 关于罗非鱼不同组织对 GSM 和 2-MIB 的蓄积机制还有待进一步探究。

3.3 罗非鱼土腥味物质膳食建议

根据本研究结论, 罗非鱼肌肉组织对于土腥味的贡献程度最大, 对比其他水产品土腥味物质的含量, 韩萃等^[22]测得虹鳟肌肉中 GSM 和 2-MIB 含量分别为 0.63、0.94 $\mu\text{g/kg}$; 薛勇等^[23]测得鳙鱼中 GSM 平均含量为 5.4 $\mu\text{g/kg}$; 大西洋

鲢^[24]中分别为 0.26~0.51、0.55~0.99 $\mu\text{g/kg}$; 大口黑鲈^[25]中分别为 5~41、17~67 $\mu\text{g/kg}$, 可见, 罗非鱼肉中土腥味物质含量处于相对较低水平, 然而, 其土腥味却较为明显, 这可能与 GSM 等土腥味物质在不同水产品中感官阈值不同有关^[26]。

为降低水产品中的土腥味, 往往通过将收获的带有较重土腥味的水产品置于不含土腥味物质的净水中养殖。研究发现, 土腥味较重的鲢鱼经净水养殖 32 d 后可明显减轻其土腥味^[27], 大西洋鲢净水养殖 10 d 后土腥味物质含量显著降低^[28]。本研究结果可加以佐证, 罗非鱼肠道内容物中 GSM 含量最高, 经清水暂养后, 摄食的土腥味物质含量降低, 其土腥味物质含量随之降低。此外, 除清水脱腥外, 根据本研究结果, 提出建议, 在消费者食用罗非鱼时, 可以通过充分去除肠道、血液和肝脏等内脏组织, 清水洗净, 尽量避免血液和内脏污染鱼肉的方法来达到降低罗非鱼土腥味的目的。而在罗非鱼养殖过程中, 降低罗非鱼对含有土腥味物质的藻类和饲料的摄食, 也能降低罗非鱼体土腥味物质的含量。

4 结 论

在本研究中, GSM 是罗非鱼鱼体内的主要土腥味物质, 2-MIB 在鱼体肠道内容物、血液、肝脏和肌肉组织中均未检出。鱼肉中的 GSM 含量与水体中的 GSM 含量具有明显的相关性。GSM 在罗非鱼不同组织中的平均含量分别为肠道内容物>肝脏>肌肉>血液, 鱼体土腥味贡献率为肌肉>肠道内容物>肝脏>血液。虽然罗非鱼中的土腥味物质在肠道中含量最高, 但是根据贡献率, 罗非鱼的土腥味物质主要集中在肌肉中, 肌肉是罗非鱼土腥味的主要贡献者。对于罗非鱼土腥味问题, 根据实验结果, 建议从 2 个方面来解决, 即养殖过程中降低土腥味物质的摄入和食用过程中充分去除土腥味物质浓度较高的组织。

参考文献

- [1] 赵雲, 桂朗, 陈良标. 罗非鱼产业发展现状[J]. 中国水产, 2020, 539(10): 54–56.
ZHAO Y, GUI L, CHEN LB. Current situation of tilapia industry [J]. Fish China, 2020, 539(10): 54–56.
- [2] 陈诏, 李华, 袁宗伟, 等. 三江县稻田养殖红罗非鱼品质特性及肌肉营养成分分析[J]. 食品工业科技, 2019, 40(23): 306–311.
CHEN Z, LI H, YUAN ZW, et al. Quality profile and muscular nutritional components of paddy-cultured red tilapia (*Oreochromis* spp.) in San Jiang Dong autonomous county [J]. Sci Technol Food Ind, 2019, 40(23): 306–311.
- [3] 肖伟, 李大宇, 祝璟琳, 等. 四种尼罗罗非鱼♀×奥利亚罗非鱼♂杂交子代肌肉营养成分对比分析[J]. 中国农学通报, 2020, 36(8): 145–150.
XIAO W, LI DY, ZHU JL, et al. Muscle nutritional components in four hybrid offspring of *Oreochromis niloticus*×*O. aureus*: A comparative analysis [J]. Chin Agric Sci Bull, 2020, 36(8): 145–150.
- [4] DUARTE F, PAULA F, PRADO CS, et al. Better fatty acids profile in fillets of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) supplemented with fish oil [J]. Aquaculture, 2020, 534: 736241.

- [5] SARASH LNE, PETER MH, ROBIN MH. Determination of system losses of geosmin and MIB in bench-scale filtration apparatus [J]. *Water Qual Res J Canada*, 2004, 39(3): 207–212.
- [6] CHISLOCKM F, OLSEN BK, CHOI J, *et al.* Contrasting patterns of 2-methylisoborneol (MIB) vs. geosmin across depth in a drinking water reservoir are mediated by cyanobacteria and actinobacteria [J]. *Environ Sci Pollut Res*, 2021, (4): 28.
- [7] 马念念, 罗国芝, 谭洪新, 等. 养殖水中土腥异味物质-土臭素和二甲基异冰片去除方法[J]. *中国水产*, 2014, (12): 72–74.
MA NN, LUO GZ, TAN HX, *et al.* Removal methods of odonotoxins and diisoborneol in aquaculture water [J]. *China Fish*, 2014, (12): 72–74.
- [8] VILALTA E, GUASCH H, MUNOZ I, *et al.* Nuisance odours produced by benthic cyanobacteria in a Mediterranean river [J]. *Water Sci Technol*, 2004, 49(9): 25–31.
- [9] 田晓萌, 裴海燕, 徐杭州, 等. 淡水有害底栖蓝藻研究进展[J]. *生态学杂志*, 2020, 32(6): 312–327.
TIAN XM, PEI HY, XU HZ, *et al.* Research progress of harmful benthic cyanobacteria in freshwater [J]. *Chin J Ecol*, 2020, 32(6): 312–327.
- [10] VAN B, DITS JS, KETELAARS H. Production and reduction of geosmin and 2-methylisoborneol during storage of river water in deep reservoirs [J]. *Water Sci Technol*, 1992, 25(2): 233–240.
- [11] PETRA C, LINDHOLM-LEHTO, VIEMMLA J. Controlling of geosmin and 2-methylisoborneol induced off-flavours in recirculating aquaculture system farmed fish-A review [J]. *Aquac Res*, 2019, 50(1): 9–28.
- [12] WHITFIELD FB. Biological origins of off-flavours in fish and crustaceans [J]. *Water Sci Technol*, 1999, 40(6): 265–272.
- [13] WHITFIELD FB, BROWNEE B, SATCHWILL T, *et al.* Quantitative analysis of trace levels of geosmin and MIB in source and drinking water using headspace SPME [J]. *Water Res*, 2000, 34: 2818–2828.
- [14] BAI, ZIWEI. Determination of geosmin and 2-methylisoborneol in fish using *in-vivo* solid phase microextraction [M]. Canada: UWSpace, 2012.
- [15] YARNPAKDEE S, BENJAKUL S, PENJAMRAS P, *et al.* Chemical compositions and muddy flavour/odour of protein hydrolysate from Nile tilapia and broadhead catfish mince and protein isolate [J]. *Food Chem*, 2014, 142: 210–216.
- [16] 张凯. 不同系统对养殖水体和罗非鱼肌肉异味物质含量的影响[D]. 上海: 上海海洋大学, 2017.
ZHANG K. Impact of different cultivation systemson the accumulation of off-flavor compounds in tilapiaflesh [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2017.
- [17] 王国超, 李来好, 郝淑贤, 等. 水产品腥味物质形成机理及相关检测分析技术的研究进展[J]. *食品工业科技*, 2012, 33(5): 401–404.
WANG GC, LI LH, HAO SX, *et al.* Research progress in the mechanism of odor compounds in aquatic product and some relative techniques of detection and analysis [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2012, 33(5): 401–404.
- [18] LINDHOLM-LEHTO PC, SUURNÄKKI S, PULKKINEN JT, *et al.* Effect of peracetic acid on levels of geosmin, 2-methylisoborneol, and their potential producers in a recirculating aquaculture system for rearing rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) [J]. *Aqual Eng*, 2019, (85): 56–64.
- [19] MUSTAPHA S, TIJANI JO, NDAMITSO MM, *et al.* A critical review on geosmin and 2-methylisoborneol in water: Sources, effects, detection, and removal techniques [J]. *Environ Monit Assess*, 2021, 193(4): 204.
- [20] 王赛. 水质、藻类变化对罗非鱼异味产生的影响及异味去除初步探讨[D]. 湛江: 广东海洋大学, 2012.
WANG S. The preliminary studyon off-odour-removal method and impact s of water quality and algal changes on off-odour generation in tilapia [D]. Zhanjiang: Guangdong Ocean University, 2012.
- [21] SCHRADER K, RUBIO SA, PIEDRAHITA R, *et al.* Geosmin and 2-methylisoborneol cause off-flavors in cultured largemouth bass and white sturgeon reared in recirculating-water systems [J]. *North Am J Aquacul*, 2005, 67(3): 177–180.
- [22] 韩萃, 魏发奕, 李丽, 等. 养殖虹鳟体内土腥味物质分布及其与水质关系的研究[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2021, 317(1): 26–33.
HAN C, WEI FY, LI L, *et al.* The distribution of off-flavor compounds in farmed rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) and their influence factors [J]. *Periodical Ocean Univ China (Nat Sci Ed)*, 2021, 317(1): 26–33.
- [23] 薛勇, 王超, 于刚, 等. 鲢鱼肉中土腥味物质的测定方法[J]. *中国水产科学*, 2010, 17(5): 1094–1100.
XUE Y, WANG C, YU G, *et al.* Determination of earthy-musty odorous compound in bighead carp meat [J]. *J Fish Sci China*, 2010, 17(5): 1094–1100.
- [24] DAVIDSON J, SCHRADER K, RUAN E, *et al.* Evaluation of depuration procedures to mitigate the off-flavor compounds geosmin and 2-methylisoborneol from Atlantic salmon *Salmo salar* raised to market-size in recirculating aquaculture systems [J]. *Aquacult Eng*, 2014, 61: 27–34.
- [25] PALLAB KS. Reducing geosmin off-flavor compounds and waste outputs through dietary phosphorus management in rainbow trout aquaculture [J]. *Aquacult Env Interac*, 2014, 6(1): 105–117.
- [26] 刘利平, 李博, 闫莉. 水产动物体内土腥味物质的来源、检测及其防控与去除的研究进展[J]. *水产学报*, 2021, 45(5): 17.
LIU LP, LI K, YAN L. Sources, determination, prevention and elimination of off-flavour compounds in aquatic animals [J]. *J Fish China*, 2021, 45(5): 17.
- [27] 朱健明, 蔡春芳, 杨超, 等. 阳澄西湖水质与鲢土腥异味相关性研究[J]. *水生态学杂志*, 2015, 36(2): 88.
ZHU JM, CAI CF, YANG C, *et al.* Effect of water quality on earthy-musty off-flavor in *Hypophthalmichthys molitrix* from Yangcheng west lake [J]. *J Hydroecol*, 2015, 36(2): 88.
- [28] BURR GS, WOLTERS WR, SCHRADER KK, *et al.* Impact of depuration of earthy-musty off-flavors on fillet quality of Atlantic salmon, *Salmo salar*, cultured in a recirculating aquaculture system [J]. *Aquacult Eng*, 2012, 50: 28–36.

(责任编辑: 张晓寒 于梦娇)

作者简介



邹剑敏, 硕士研究生, 主要研究方向为水产品质量安全与膳食评估。
E-mail: 408220893@qq.com

宋超, 副研究员, 主要研究方向为渔业生态环境和水产品质量安全和风险评估方面的研究。
E-mail: songchao@ffrc.cn

陈家长, 研究员, 主要研究方向为渔业生态环境修复。
E-mail: chenjz@ffrc.cn